

부분최소제곱 구조방정식(PLS-SEM)을 이용한 폭염과 가뭄의 영향평가

유지영* · 김장경** · 한정우*** · 김태웅****

Yoo, Jiyoung* · Kim, Jang-Gyeong** · Han, Jeongwoo*** · Kim, Tae-Woong****

Impact Assessment between Heatwave and Drought Based on PLS-SEM

ABSTRACT

The occurrence mechanisms of heatwave have been conventionally studied at a synoptic scale. However, the implications of precedent droughts on the following up heatwave occurrences have not been elucidated and are important to address the complex causal mechanisms of heatwaves. Therefore, this study evaluated the causality and implication of the seasonally antecedent droughts to summer heatwaves that occurred for 46 years since 1974 using partial least squares-structural equation modeling (PLS-SEM). The resulting contribution of winter (spring and summer) droughts to summer heatwaves for Seoul-Gyeonggi, Gangwon, and Chungcheong provinces were 37 % (29 % and 22 %), 21 % (18 % and 29 %), and 17 % (8 % and 38 %), respectively. This is due to the regional variability of seasonal drought impacts. Furthermore, Gangwon and Chungcheong provinces, which have a higher level of impacts of summer droughts to summer heatwaves, are more likely to be exposed to the compound drought-heatwave damages compared to Seoul-Gyeonggi province, which has relatively a low-level impact of summer drought.

Key words : Drought, Heatwave, Structural equation modeling, Causal relationship, Impact assessment

초록

폭염의 발생 메커니즘은 대부분 중관 규모적 관점에서 연구가 이루어지고 있으나, 폭염발생 이전의 또 다른 자연재해로 인한 연쇄적인 영향을 해석하기 위한 연구도 중요하다. 본 연구에서는 폭염 발생 이전에 나타나는 가뭄과의 인과관계 및 영향을 평가하기 위해 부분최소제곱 구조방정식 모형(PLS-SEM)을 이용하였다. 1974년부터 약 46년간 발생한 여름철 폭염에 미치는 계절별 가뭄의 영향정도는, 겨울철 서울(경기)지역은 37 %, 강원지역은 21 %, 충청지역은 17 %이며, 봄철 서울(경기)지역은 29 %, 강원지역은 18 %, 충청지역은 8 %이며, 여름철 서울(경기)지역은 22 %, 강원지역은 29 %, 충청지역 38 %로 확인되었다. 이는 지역별로 나타나는 폭염과 계절별 가뭄이 미치는 영향의 정도가 다르기 때문에 따라 나타나는 결과로 해석된다. 여름철 가뭄-폭염 간의 영향이 크게 나타난 강원, 충청 지역은 서울(경기)지역에 비해 가뭄-폭염으로 인한 피해양상이 복합적으로 나타날 가능성이 있다.

검색어 : 가뭄, 폭염, 구조방정식모형, 인과 관계, 영향평가

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

** 종신회원 · 베이저안웍스 대표, 공학박사 (Bayesianworks Research Institute · kjk2388@gmail.com)

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

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

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

Received September 29, 2020/ revised November 3, 2020/ accepted November 3, 2020

1. 서론

최근 기후변화 등의 원인으로 기온 상승과 강우 패턴의 변화로 인한 기상재해의 발생빈도는 점차 증가하고 있으며, 우리나라에서도 실제 여름철 폭염과 매년 반복되는 가뭄으로 인한 피해가 증가하고 있다. 또한, 이러한 폭염, 가뭄, 산불 등의 기상재해는 점차 복합 및 연쇄적으로 발생하는 특성을 지니고 있어, 유럽, 미국, 중국 등 여러 국가에서는 이러한 복합재해를 해석을 위한 다중 위험 프레임워크 개발을 위해 노력하고 있다(AghaKouchak et al., 2018; Sutanto et al., 2020).

과거 선행연구에 따르면 지구온난화로 인한 기온상승이 극한 건조 위험과 동시에 발생할 확률이 커질 것이다(Mazdiyasi and AghaKouchak, 2015; Forzieri et al., 2016; Zscheischler and Seneviratne, 2017). 즉 고온(또는 폭염)의 증가 가능성을 감안한다면, 이와 관련된 또 다른 기상재해(가뭄 또는 산불 등)와의 영향 관계를 이해하기 위한 노력이 필요하다. 한국환경정책평가연구원의 2020년 폭염영향 보고서에 따르면, 우리나라는 1973년부터 2019년까지 일최고기온의 극값은 1.5 °C 증가, 폭염일수는 6.9일이 증가하였다(Korea Environment Institute, 2020).

또한, 우리나라에서 가장 더웠던 여름은 1994년과 2018년으로 폭염이 심하게 발생한 시기이며, 1994년은 폭염일수가 31.1일(역대 2위), 2018년은 31.5일(역대 1위)이었다. 해당연도는 과거 심한 가뭄이 발생한 해와 일치하는 것을 알 수 있다. 실제 지난 2018년 여름은 기상관측 이래 최고기온이 경신되었던 해이며, 강원도 홍천에서는 관측 사상 최고기온(41 °C)이 나타났다. 동일 해 3월에는 강원도 지역 내 가뭄피해로 인한 제한급수가 시행되었고, 이어진 8월에는 강원도 횡성군(논 물바름 피해), 강원도 양구군(밭 시들편해)에서는 가장 심각한 가뭄피해가 발생한 바 있다. 이처럼 가뭄과 폭염은 농업 손실 및 식수 부족으로 인한 피해가 복합적으로 발생하는 경우, 인간과 사회에 심각한 위협으로 작용할 가능성이 있다.

폭염은 대기로의 총 에너지 전달을 감소시켜 대류 강수를 감소시키고 이로 인한 토양강수 피드백 루프를 유발하여 가뭄의 발생 가능성을 증가시키는 경향이 있다(Zaitchik et al., 2006). 과거 선행연구를 분석한 결과, 강수와 온도 사이의 상호 작용을 해석하기 위한 연구는 활발히 진행되었으나(Hao and AghaKouchak, 2013; Shukla et al., 2015), 가뭄과 동시에 발생하는 폭염의 관계 또는 폭염과 가뭄 사이에 나타나는 복합적인 영향 관계를 분석하는 연구는 부족한 실정이다(Leonard et al., 2014). Sutanto et al.(2020)은 유럽 전역의 폭염, 가뭄 및 화재와 같은 건조 위험에 대한 과거 데이터를 사용하여 복합 및 단계적 위험에 대한 시공간적 패턴을 분석한 바 있다. Kong et al.(2020)은 가뭄과 폭염의 의존성을 살펴보기 위해서 1962년부터 2015까지 중국 동부에서 발생한 여름

철 가뭄과 폭염의 동시발생 빈도를 분석하였으며, 그 결과 가뭄과 폭염이 동시에 발생할 가능성이 높은 위험지역을 확인하였다.

이와 관련하여 우리나라에서는 지구 온난화로 인한 여름철 기온 및 증발산의 증가로 토양수분의 부족이 발생할 가능성은 확인되고 있으나, 실제 발생한 과거 폭염과 가뭄에 대한 복합적인 발생특성을 정량적으로 분석하는 연구는 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 발생한 가뭄과 폭염 사이의 의존성을 이해하기 위해, 지역별로 나타나는 가뭄과 폭염에 대한 인과 관계를 분석하였다. 이를 위해 요인분석, 경로분석, 회귀분석을 결합하여 복잡한 모형 내 의존성 및 인과관계를 분석할 수 있는 부분최소제곱 구조방정식(Partial Least Squares - Structural Equation Modeling, PLS-SEM)을 활용하였다.

본 연구는 1974년부터 2019년까지 발생한 폭염과 가뭄을 대상으로, 폭염이 발생하기 이전의 계절별 가뭄의 인과관계를 분석하였다. 이를 위해서는 (i) 우리나라 중부지방(서울경기, 강원, 충청)에서 발생한 폭염자료를 수집하고, (ii) 계절별 가뭄 관련 데이터베이스를 이용하여 폭염 발생에 미치는 영향평가를 위한 인과관계 구조를 설정하였으며, (iii) PLS-SEM을 통한 폭염에 대한 가뭄의 영향 특성을 분석하였다.

2. 분석자료 및 연구방법

2.1 분석자료

우리나라는 폭염으로 인해 재해 발생의 우려가 있을 때 이를 경고하기 위해 폭염특보를 발령하고 있다. 폭염특보는 주의보와 경보 2가지 단계로 발표하며, 폭염으로 인한 사회·경제적 영향과 이에 따른 대응 요령을 함께 제공하기 위한 폭염 영향예보(관심, 주의, 경계, 심각)가 시행되고 있다. 또한, 기상청 기상자료개방포털에서는 1973년부터 최근까지의 전국 및 광역시도별 월별 폭염일수, 연도별 최장 폭염 지속일수 등이 포함되어 있는 폭염기록 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 우리나라 중부지방에 포함된 서울경기, 강원(강원영서, 강원영동), 충청(충청남도, 충청북도) 지역을 대상으로 지난 1974년부터 2019년까지의 폭염 발생자료를 수집하였다. 또한, 지역별 가뭄 및 기온 자료를 구축하기 위하여, 기상청의 (유인)종합기상관측장비(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 누적 강수량을 이용하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 산정한 후, 계절별 기상학적 가뭄이 폭염에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2 연구방법

폭염 발생기간 및 이전 시점의 계절별 기상학적 가뭄에 따른 영향을 평가하기 위해 앞서 수집한 분석자료를 대상으로 다양한 시간 단위의 자료를 구축하였다(Fig. 1 참고). 예를 들어, 2018년 6월부터 8월까지 발생한 여름철 폭염(발생일수, 일최대 기온, 최대 지속일수)은 전년도 겨울부터 시작된 가뭄(DJF), 봄철 가뭄(MAM) 및 폭염발생시기와 동일한 여름철 가뭄(JJA)에 의해 영향을 받는다. 이를 정량적으로 표현하기 위해 이전 연도의 12월, 당해 연도의 1월 및 2월 SPI3 (3-month SPI)를 겨울철 가뭄 상태를 나타내는 지표로, 3월, 4월, 5월의 SPI3를 봄철 가뭄 상태를 나타내는 지표로, 6월, 7월, 8월의 SPI3를 여름철 가뭄 상태를 나타내는 지표로 활용하였다.

일반적으로 다변량 인자를 고려하여 영향관계를 추론하기 위해서는 상관성 분석, 주성분 분석, 회귀분석, 요인분석 등의 다양한 통계적 기법을 활용한다(Barbero et al., 2014; Urbietta et al., 2015; Nogueira et al., 2017; Marin et al., 2018). 그러나 이와 같은 기법은 다양한 독립변수 및 2개 이상의 종속변수를 구성하는 복잡한 모형에서 변수들 간의 의존구조 및 인과관계를 해석하는데 있어 한계가 있다. 본 연구에서는 요인분석, 경로분석, 회귀분석을 결합하여 변수들 사이의 복잡한 의존성 및 인과관계를 해석하는

데 용이한 부분최소제곱 구조방정식을 활용하였다. 즉, 월별 가뭄지수 및 폭염 자료와 같은 측정변수들의 선형결합으로 잠재변수를 정의하고, 구조모형 내 가중관계(weight relation)를 해석하여 영향 정도를 평가하였다(Fornell and Cha, 1994).

Fig. 2는 PLS-SEM의 변수 관계를 시각적으로 나타내는 개념도이며, PLS-SEM은 크게 두 가지의 모형(구조모형, 측정모형)으로 구성된다. 구조모형(Structural Model)은 잠재변수 간의 관계를 나타내며, 측정모형(Measurement Model)은 잠재변수를 설명하는 측정변수와의 관계를 나타낸다. Fig. 2에서 잠재변수는 직접 측정이 되지 않은 변수로서 타원의 형태로 표시되며, 잠재변수를 설명하는 측정변수는 직사각형의 형태로 표현된다. 또한, PLS-SEM 모형 내 모든 변수 사이의 인과관계는 단일방향 화살표로 표현된다.

또한 독립변수와 관련이 있는 잠재변수는 외생 잠재변수(X_1, X_2)라고 하며, 종속변수와 관련이 있는 잠재변수는 내생 잠재변수(Y)라고 한다. 일반적으로 PLS-SEM은 측정변수들이 잠재변수를 얼마나 잘 나타내는지 평가하는 외부모형 평가와 잠재변수들 간의 인과관계의 타당성을 평가하는 내부모형 평가를 수행한다(Fornell and Larcker, 1981; Hair et al., 1998; Shipley, 2000). 본 연구에서는 폭염, 겨울철 가뭄, 봄철 가뭄, 여름철 가뭄과 관련된

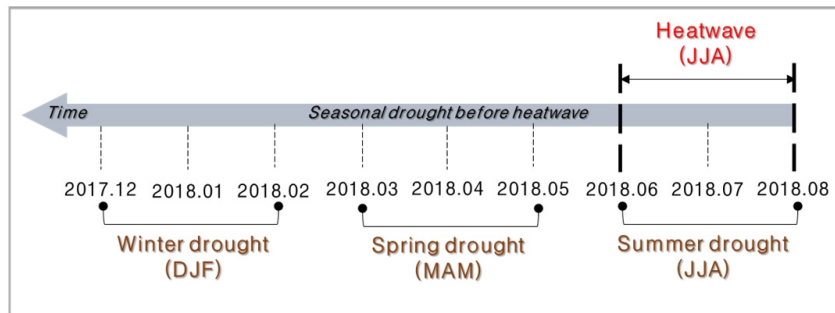


Fig. 1. Data Construction-Related Seasonal Drought and Heatwave

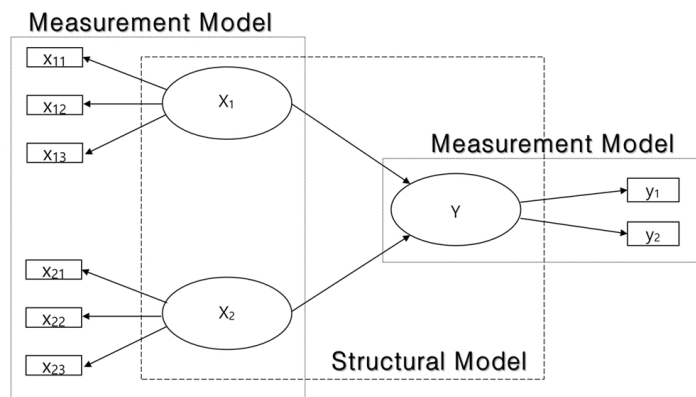


Fig. 2. Conceptual Diagram for PLS-SEM

총 4가지의 잠재변수를 구성하였으며, 각 잠재변수 내 측정변수를 이용하여 PLS-SEM을 구축하였다.

3. 폭염 발생에 미치는 가뭄의 영향평가

3.1 과거 폭염발생 특성 분석

폭염일수란 낮 최고기온이 33도 이상인 날의 횟수를 의미한다. 우리나라에서는 기후변화로 인한 최근 폭염의 발생일수와 빈도가 증가하고 있으며(Yeh et al., 2018; Min et al., 2020), 지난 2018년 7~8월은 역대 최고 수준인 폭염일수(31.5일)가 발생하여 심각한 인명 및 재산피해가 발생한 바 있다(Korea Meteorological Administration, 2018). 본 연구에서는 중부지역(서울경기, 강원, 충청)을 대상으로 하여 과거 매년 6월부터 8월의 폭염발생 현황을 검토하였다. 1974년부터 1999년까지의 평균 폭염일수는 강원영서 지역이 9.9일로 가장 길었고, 다음으로는 충북(7.9일), 충남(8.5일), 강원영동(6.3), 서울경기(4.7)로 확인되었다. 또한 2000년 이후 10년 동안에도 강원영서 지역이 11일로 가장 긴 폭염일수가 나타났으며, 이어 충남(7.7일), 강원영동(7.3일), 충북(6.6일), 서울경기(4.4일) 순으로 확인되었다. 이 중에서 2000년 이전과 대비하여 폭염일수가 증가한 지역은 강원도가 유일하다. 특히 강원영동의 폭염일수는 2000년 이전과 비교하여 상대적으로 가장 큰 폭(1일 증가)으로 상승하였다. 반면 2000년 이전 대비 폭염일수가 감소한 지역은 서울경기, 충남, 충북이며, 특히 충남의 폭염일수가 상대적으로 크게 감소(0.8일)하였다.

최근 10년 동안의 중부지역 내 폭염발생 현황을 살펴본 결과 강원영서에서 많은 폭염일수가 나타났다. Fig. 3은 1974년부터 2019까지 발생한 여름철(6~8월)의 폭염일수와 일 최고기온을 도시한 결과이다. 여기서 가장 눈에 띄는 폭염발생 시점은 1994년과

2018년이며, 이는 1973년 기상청 폭염자료 집계 이래로 가장 큰 폭염일수가 나타난 해와 일치한다.

또한, 해당연도는 과거 가뭄기록 조사에서 가뭄이 심하게 발생한 해이다. 특히 1994년도 가뭄은 우리나라에서 기록된 장기 가뭄의 대표사례이며, 2018년 가뭄은 국가적 차원에서 처음으로 가뭄피해 통계집을 작성한 연도이기도 하다. 이처럼 극심한 가뭄이 발생한 해에 연속으로 극심한 폭염이 연속으로 발생하는 경우에는 복합재해로 인한 피해는 더욱 증가할 것이다. 이러한 폭염은 대부분 중관 규모적 관점에서 원인을 규명하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 또 다른 측면에서는 가뭄과 같은 또 다른 자연재해로 인한 폭염으로 이어지는 연쇄적인 영향의 효과를 살펴볼 필요가 있다.

3.2 PLS-SEM 개발 및 모형 적합성 검증

본 연구에서 PLS-SEM을 구성하기 위해서 총 4개(겨울철 가뭄, 봄철 가뭄, 여름철 가뭄, 폭염)의 잠재변수를 사용하였으며, 이 중에서 외생 잠재변수와 관련한 설명변수는 계절별 가뭄의 영향을 나타내는 지표표를 의미한다. Table 1과 같이 PLS-SEM의 내부모형은 잠재변수별 측정모형에 필요한 설명변수를 이용하여 구성하였으며, 각 변수에 관련한 기초통계량을 정리하여 제시하였다. 여기서 사용한 겨울철 가뭄(DJF_Drought)의 설명변수는 폭염 발생 이전의 가뭄 상황을 나타내는 변수는 X_{11} , X_{12} , X_{13} 이며, 봄철 가뭄(MAM_Drought)과 관련한 설명변수는 X_{21} , X_{22} , X_{23} 이다. 또한 폭염 발생기간과 동일한 시기의 여름철 가뭄(JJA_Drought)과 관련한 설명변수는 X_{31} , X_{32} , X_{33} 이다. 다음으로 내생 잠재변수와 관련한 폭염의 설명변수는 폭염 발생일수(Y_1)와 일 최대 기온(Y_2), 최장 폭염 지속일수(Y_3)로 구성된다.

이처럼 구성된 PLS-SEM은 외부모형 평가를 통해 측정변수들에 대한 신뢰도 및 타당도를 평가하고 모형의 적합성을 검증해야

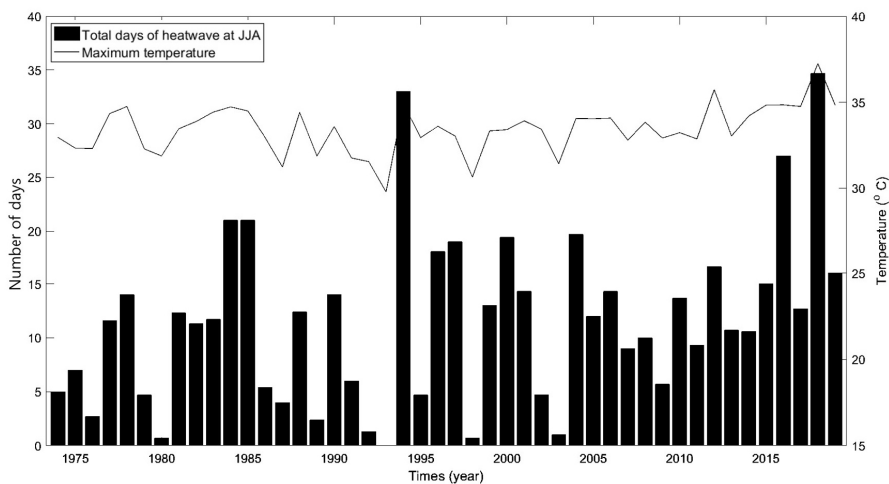


Fig. 3. Records of Heatwave During 1974-2020 in Gangwon-Yeongseo Region (the Western Part)

한다. 본 연구에서는 신뢰도 평가를 위해 Table 2와 같이 크론바흐 알파(Cronbach's alpha, C_α) 계수를 산정하였다. 일반적으로 사용되는 C_α 의 기준치는 0.7 이상 또는 최소 0.6 이상이다. 본 연구에서 구축한 서울(경기)지역과 충청지역의 PLS-SEM 내 가품의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 는 모두 0.7 이상이며, 폭염의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 는 0.8 이상인 것으로 확인되었다. 반면 강원지역은 겨울철 가품의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 가 다소 낮은 값(0.678)을 나타내고, 나머지 가품 및 폭염의 영향을 나타내는 잠재변수의 C_α 는 모두 0.7 이상으로 확인되었다. 다음으로는 판별 타당도(discriminant validity) 평가를 통해 여러 가지 측정변

수들이 얼마나 의미 있게 구별되었는지를 검토하였다. 이는 측정지표와 잠재변수 간의 교차 적재량(cross loadings)을 기준으로 확인할 수 있다. Table 3은 서울경기, 강원, 충청 지역의 측정지표와 잠재변수 간의 교차 적재량 추정 결과를 나타낸다. 여기서 측정대상 잠재변수에서의 적재량이 다른 잠재변수에서의 교차 적재량보다 상대적으로 큰 값(굵은 글자체 참조)을 나타내야 한다. 즉, 본 모형의 측정변수들은 잠재변수에 따라 구별된다는 것을 알 수 있다.

외부모형의 적합도 검증을 통해 결정된 PLS-SEM은 잠재변수 간의 인과관계를 나타내는 내부모형에 대한 평가가 필요하다. 따라서 구조모형에 대한 경로 분석, 모형의 설명력, 모형적합도 기준에

Table 1. Descriptive Statistics for Measured Variables for 3 Regions

Seoul	Dec_SPI3	Jan_SPI3	Feb_SPI3	Mar_SPI3	Apr_SPI3	May_SPI3	Jun_SPI3	Jul_SPI3	Aug_SPI3	Heatwave	Max_T	Max_D
	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Mean	-0.022	-0.003	0.004	0.001	0.000	-0.003	-0.013	0.020	0.022	5.7	34.4	6.9
Median	-0.350	0.009	0.146	0.073	0.121	0.185	-0.057	-0.096	0.056	3.9	34.6	5.0
Std.	1.010	1.010	1.010	1.020	1.020	1.020	1.020	1.010	1.010	5.7	1.4	6.4
Minimum	-2.040	-1.710	-2.610	-1.780	-2.880	-3.050	-1.830	-1.980	-2.150	0.0	31.5	0.0
Maximum	2.660	2.690	1.780	2.710	1.650	2.080	2.530	3.090	2.670	27.8	38.8	33.0

Gangwon	Dec_SPI3	Jan_SPI3	Feb_SPI3	Mar_SPI3	Apr_SPI3	May_SPI3	Jun_SPI3	Jul_SPI3	Aug_SPI3	Heatwave	Max_T	Max_D
	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Mean	-0.029	-0.002	-0.003	0.002	0.027	0.001	-0.011	0.017	0.039	9.4	33.3	5.8
Median	0.068	-0.005	-0.203	-0.096	0.211	0.093	-0.270	0.115	0.015	8.4	33.4	5.0
Std.	0.990	1.010	1.000	1.020	1.000	1.020	1.010	1.010	0.978	6.7	1.4	4.5
Minimum	-2.460	-1.850	-2.510	-1.990	-2.560	-2.780	-2.230	-2.120	-2.000	0.0	29.4	0.0
Maximum	2.190	2.670	2.220	2.810	1.940	2.090	2.610	2.700	2.470	34.7	37.2	29.0

Chungcheong	Dec_SPI3	Jan_SPI3	Feb_SPI3	Mar_SPI3	Apr_SPI3	May_SPI3	Jun_SPI3	Jul_SPI3	Aug_SPI3	Heatwave	Max_T	Max_D
	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Mean	-0.031	-0.002	0.002	0.000	0.011	0.000	-0.010	0.021	0.033	8.9	34.4	8.0
Median	-0.121	-0.065	-0.001	-0.189	-0.065	0.128	-0.019	-0.005	-0.038	8.2	34.4	6.0
Std.	0.995	1.010	1.010	1.020	1.010	1.020	1.010	1.010	0.989	7.1	1.3	6.9
Minimum	-2.150	-1.860	-2.520	-2.040	-2.310	-3.280	-2.180	-2.170	-2.330	0.0	31.0	0.0
Maximum	2.600	2.810	1.930	2.480	2.000	2.070	2.390	2.800	2.420	35.5	38.5	37.0

*Heatwave : Number of days of heatwave (days), Max_T : Daily Maximum temperature (°C), Max_D : Maximum duration of heatwave (days)

Table 2. Reliability Analysis for Measured Variables for 3 Regions Using Cronbach's Alpha

Variable	Region	Seoul	Gangwon	Chungcheong
	DJF_Drought		0.723	0.678
MAM_Drought		0.719	0.720	0.738
JJA_Drought		0.782	0.788	0.802
Heatwave		0.836	0.763	0.814

Table 3. Cross Loadings of Manifest Variables for 3 Regions

Measured variables		DJF_D	MAM_D	JJA_D	Heatwave	
Seoul	DJF_Drought	X ₁₁	0.821	-0.122	-0.090	-0.362
		X ₁₂	0.899	0.065	0.021	-0.324
		X ₁₃	0.683	0.263	0.242	-0.291
	MAM_Drought	X ₂₁	0.299	0.639	0.294	-0.274
		X ₂₂	0.008	0.905	0.356	-0.360
		X ₂₃	-0.087	0.850	0.331	-0.350
	JJA_Drought	X ₃₁	0.011	0.647	0.785	-0.309
		X ₃₂	0.052	0.240	0.911	-0.329
		X ₃₃	0.084	0.106	0.806	-0.263
	Heatwave	Y ₁	-0.091	-0.141	-0.203	0.369
		Y ₂	-0.184	-0.209	-0.238	0.535
		Y ₃	0.045	0.000	-0.080	0.029
Gangwon	DJF_Drought	X ₁₁	0.393	-0.015	-0.022	-0.056
		X ₁₂	0.825	0.233	0.036	-0.192
		X ₁₃	0.931	0.544	0.213	-0.374
	MAM_Drought	X ₂₁	0.692	0.761	0.161	-0.320
		X ₂₂	0.324	0.897	0.255	-0.297
		X ₂₃	0.029	0.741	0.350	-0.248
	JJA_Drought	X ₃₁	0.170	0.523	0.733	-0.254
		X ₃₂	0.084	0.186	0.915	-0.325
		X ₃₃	0.160	0.143	0.859	-0.361
	Heatwave	Y ₁	-0.250	-0.284	-0.219	0.696
		Y ₂	-0.341	-0.328	-0.333	0.926
		Y ₃	-0.196	-0.166	-0.100	0.427
Chungcheong	DJF_Drought	X ₁₁	0.509	-0.134	-0.149	-0.073
		X ₁₂	0.827	0.129	0.073	-0.133
		X ₁₃	0.912	0.264	0.254	-0.277
	MAM_Drought	X ₂₁	0.524	0.567	0.218	-0.129
		X ₂₂	0.231	0.932	0.283	-0.190
		X ₂₃	-0.054	0.897	0.371	-0.261
	JJA_Drought	X ₃₁	0.100	0.589	0.824	-0.387
		X ₃₂	0.158	0.263	0.919	-0.369
		X ₃₃	0.185	0.061	0.796	-0.353
	Heatwave	Y ₁	-0.121	-0.079	-0.182	0.407
		Y ₂	-0.222	-0.181	-0.336	0.790
		Y ₃	-0.086	-0.022	-0.071	0.191

대한 총 3가지 검토를 수행하였다. 첫째, 경로계수 평가항목은 부트스트랩을 사용하여 분석된 P(<0.05) 값을 활용하여 통계적 유의수준을 기준으로 평가되었다. 둘째, 내생 잠재변수에 대한 외생 잠재변수들의 설명력을 평가하기 위해 모형의 설명력을 나타내는 평가항목으로 내생(종속)변수의 f²값을 검토하였다. 일반적으

로 f²값은 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). 그 결과, 서울(경기)지역의 연구모형에서 계산된 내생(종속)변수 f²값은 0.35, 강원지역의 f²값은 0.25, 충청지역의 f²값은 0.23으로서, 서울(경기)지역의 계절별 가뭄 영향에 따른

폭염 발생의 설명력이 가장 크며, 강원지역과 충청지역은 보통수준의 설명력을 지니고 있는 것으로 해석할 수 있다(Figs. 4~6참고). 셋째, 모형적합도(Goodness of Fit, GoF) 평가항목은 0.36 이상인 경우(상), 0.25 이상~0.36 미만인 경우(중), 0.1 이상~0.25 미만인 경우(하)로 구분하여 평가된다(Tenenhaus et al., 2005). 서울(경기)지역의 연구모형에서 계산된 GoF 값은 0.48, 강원지역의 GoF 값은 0.40, 충청지역의 GoF 값은 0.39으로 나타났으며, 이는 판단 기준 범위에 따라 3개의 지역 모두 연구모형의 적합성은 검증되었다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 서울(경기)지역, 강원지역, 충청지역의 폭염에 대한 선행 가뭄의 영향을 검토하기 위한 계절별 가뭄을 잠재변수로 정의한 PLS-SEM을 개발하였으며, 폭염의 영향에 미치는 계절별

가뭄의 영향은 경로계수를 이용하여 해석할 수 있다. 본 연구의 결과를 살펴보면, 구조모형의 경로계수는 모두 통계적으로 유의한 음(-)의 값을 나타내고 있다. 즉, 계절별 가뭄의 영향을 나타내는 측정변수(가뭄지수)는 큰 음수 값을 갖을수록 가뭄이 심해지는 것을 의미하고, 폭염의 영향을 나타내는 측정변수(폭염일수, 최고 온도, 지속일수)는 큰 양수 값일수록 폭염이 심함을 의미한다. 따라서 가뭄이 심해짐에 따른 폭염발생에 있어 양의 영향관계를 갖는 것으로 해석할 수 있다.

서울(경기)지역의 PLS-SEM에 의하면 폭염이 발생하기 이전의 겨울철 가뭄으로 인해 폭염에 미치는 영향은 0.37로 나타났다. 이는 봄철 가뭄에 의한 영향(0.29)과 여름철 가뭄에 의한 영향(0.22)에 비해 상대적으로 큰 것이다. 반면, 강원과 충청지역의 PLS-SEM

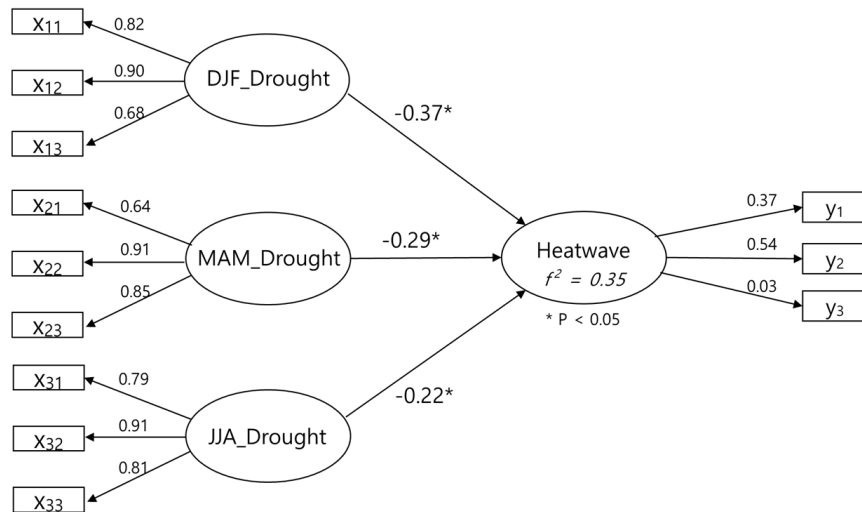


Fig. 4. The PLS-SEM for Impact Between Heatwave and Drought in Seoul Region

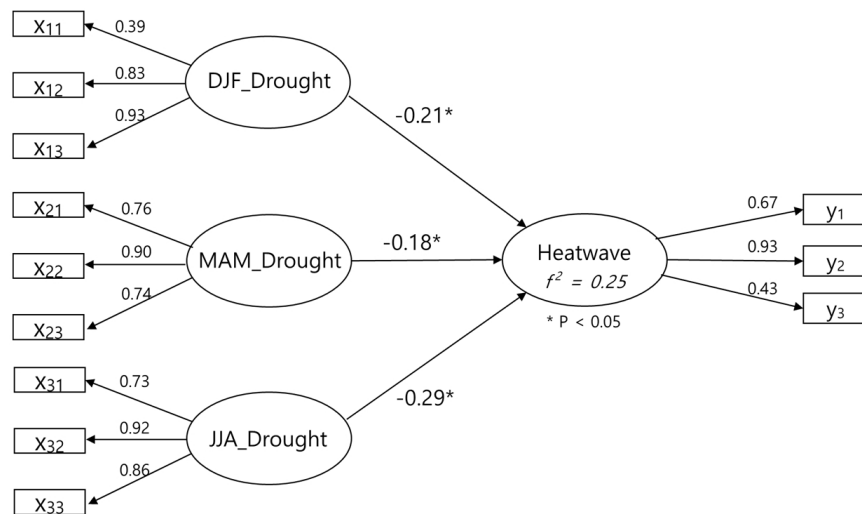


Fig. 5. The PLS-SEM for Impact Between Heatwave and Drought in Gangwon Region

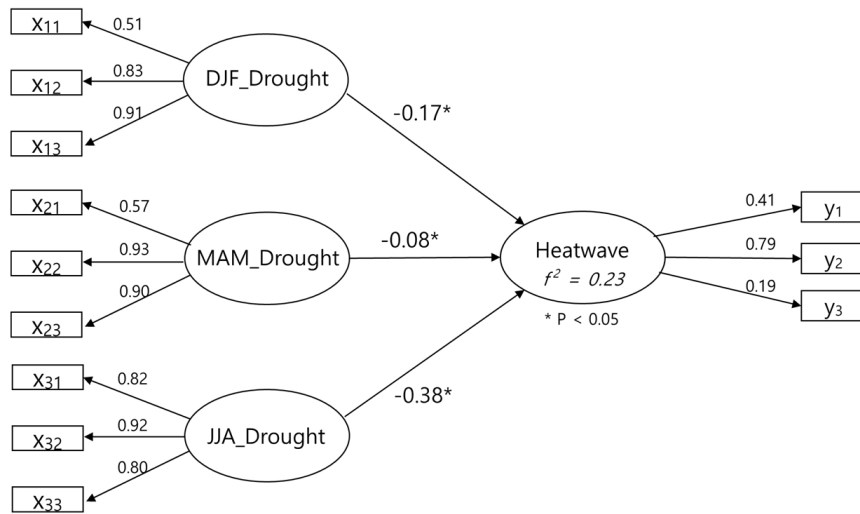


Fig. 6. The PLS-SEM for Impact Between Heatwave and Drought in Chungcheong Region

에 의하면 여름철 가뭄에 의한 폭염의 영향(강원은 0.29, 충청은 0.38)은 겨울철과 봄철 가뭄에 비해 큰 것으로 확인된다. 이처럼 지역별로 다르게 나타나는 계절별 가뭄의 특성은 연구모형 설정 시 가정된 해당 지역 내 가뭄과 폭염 사이의 인과성에 의한 차이라고 해석할 수 있다. 즉, 서울(경기)지역과 비교하여 강원과 충청지역에서는 여름철 가뭄으로 인해 폭염에 영향을 미치게 되어 연쇄적인 피해에 더욱 취약할 가능성이 있다.

또한, 겨울철 가뭄의 영향을 나타내는 측정변수 중 서울(경기)지역에서는 이 전년도 12월과 1월달 가뭄지수에 의한 설명력이 상대적으로 크게 나타났고, 강원과 충청지역에서는 1월과 2월달 가뭄지수에 의한 겨울철 가뭄의 설명력이 큰 것으로 확인되었다. 봄철 가뭄의 영향에서는 4월달 가뭄지수에 의한 설명력이, 여름철 가뭄의 영향에서는 8월달 가뭄지수에 의한 설명력이 서울(경기), 강원, 충청지역에서 모두 큰 것으로 확인되었다. 즉, 계절별 가뭄의 영향을 나타내는 잠재변수별 상대적으로 큰 설명력을 나타내는 지표에 대한 지역간의 차이는 크게 발견되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라 중부지역에서 발생하는 폭염에 영향을 미치는 계절별 가뭄의 특성을 분석하기 위해, 지난 1974년 이후부터 2019년까지 발생한 여름철 폭염 발생특성을 분석하였다. 우리나라 중부지역(서울(경기), 강원영동, 강원영서, 충청남도, 충청북도)에 대한 여름철 폭염기록을 살펴본 결과, 2000년 기준으로 이전과 이후 시점에서 모두 강원영서 지역에서 가장 큰 폭염일수를 기록하였다. 반면, 2000년 전후로 폭염일수가 가장 큰 폭으로 증가한 지역은 강원영동 지역이었다. 또한, 과거 46년 동안 발생한 여름철

최대 폭염일수는 충청지역은 35.5일(2018년), 강원지역은 34.7일(2018년), 서울(경기)지역은 27.8일(2018년)로 모두 동일한 해에 발생한 것으로 확인되었다. 또한 여름철 최대기온과 폭염 최장 지속일이 발생한 해 역시 2018년으로 확인되었다. 이처럼 여름철 폭염에 대한 사례분석을 통해, 과거 극한 폭염이 발생한 해는 과거에 발생한 또 다른 자연재해 중 극한 가뭄과 발생시기가 중복되어 가뭄-폭염 간의 인과분석의 필요성을 확인하였다.

본 연구에서는 겨울철 가뭄, 봄철 가뭄, 여름철 가뭄을 폭염 발생의 요인으로 가정된 후, PLS-SEM을 이용하여 폭염의 영향평가를 수행하기 위해 측정변수를 결정하였다. 이는 PLS-SEM의 내부모형을 구성하는데 필요한 잠재변수(겨울철, 봄철, 여름철 가뭄, 폭염)를 설명하기 위한 측정변수로 활용되었으며, 이를 기반으로 설정된 지역별 PLS-SEM에 대한 적합도 평가를 수행하여 외부모형과 내부모형의 객관성을 확보하였다.

이러한 PLS-SEM을 기반으로 하는 가뭄-폭염의 영향 평가기법은 폭염 발생에 원인으로 작용할 가능성이 있는 요인(계절별 가뭄의 영향)에 따른 인과관계를 해석할 수 있다. 즉, PLS-SEM 내 구조모형을 통해 폭염에 미치는 계절별 가뭄의 영향 정도는 경로계수(표준화회귀계수)를 이용하여 정량적 평가가 가능해진다. 이에 따라 중부지역 내 폭염에 미치는 가뭄의 영향력을 평가한 결과, 폭염으로 미치는 계절별 가뭄의 영향 정도가 지역별로 다른 것을 확인할 수 있었다. 서울지역에서는 겨울철 가뭄은 폭염에 미치는 영향력이 37%이며, 강원지역에서는 여름철 가뭄은 폭염에 미치는 영향력이 29%이며, 충청지역에서는 여름철 가뭄은 폭염에 미치는 영향력이 38%로 가장 큰 것이 확인되었다. 이는 지역별로 다르게 나타나는 계절별 가뭄의 심도에 따른 여름철 폭염과의 연관성에 따른 결과로 판단되며, 실제 폭염에 높은 영향력을 보였던 여름철 가뭄은 서울

(경기)지역에 비해 강원과 충청지역에서 심한 수준으로 발생한 것이 확인된다(Table 1 참고).

향후 가뭄과 폭염의 연쇄적 발생으로 인한 복합적인 위험을 최소화하기 위해서는 선행되는 가뭄상황과 연계하여 폭염을 감시하기 위한 노력이 필요하며, 이를 위해서는 폭염에 미치는 다양한 자연재해와의 연계성을 모색하여 요인들 간의 인과관계를 규명할 수 있어야 한다. 즉, 본 연구에서는 중부지역 내 계절별 가뭄이라는 선행 조건에 따른 폭염 발생의 관계를 해석하였으며, 이를 통해 가뭄의 영향예보 및 폭염 예 경보를 위한 가뭄-폭염 정보의 연계적 활용성을 기대해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2019-MOIS31-011).

References

- AghaKouchak, A., Huning, L. S., Chiang, F., Sadegh, M., Vahedifard, F., Mazdiyasi, O., Mofstakhari, H. and Mallakpour, I. (2018). "How do natural hazards cascade to cause disasters?" *Nature*, Vol. 561, pp. 458-460.
- 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. 12, 124009.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Fornell, C. and Cha, J. (1994). "Partial least squares." *Advanced Methods of Marketing Research*, In R. P. Bagozzi (Ed.), Basil Blackwell, 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.
- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R. and Cid, A. (2016). "Multi-hazard assessment in Europe under climate change." *Climatic Change*, Vol. 137, pp. 105-119.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. and Black, W. C. (1998). *Multivariate analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Hao, Z. and AghaKouchak, A. (2013). "Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model." *Advances in Water Resources*, Vol. 57, pp. 12-18.
- Kong, Q., Guerreiro, S. B., Blenkinsop, S., Li, X. F. and Fowler, H. J. (2020). "Increases in summertime concurrent drought and heatwave in eastern China." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 28, 100242.
- Korea Environment Institute (KEI) (2020). *Heatwave impact report* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2018). *2018 Abnormal climate report* (in Korean).
- Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., Van den Hurk, B., McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, D. and Stafford-Smith, M. (2014). "A compound event framework for understanding extreme impacts." *WIREs Climate Change*, Vol. 5, No. 1, pp. 113-128.
- Marin, P. G., Julio, C. J., Arturo, R. T. D. and Jose, V. N. D. (2018). "Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico." *Chinese Geographical Science*, Vol. 28, pp. 25-37.
- Mazdiyasi, O. and AghaKouchak, A. (2015). "Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, PNAS, Vol. 112, No. 37, pp. 11484-11489.
- Min, K. H., Chung, C. H., Bae, J. H. and Cha, D. H. (2020). "Synoptic characteristics of extreme heatwaves over the Korean peninsula based on ERA interim reanalysis data." *International Journal of Climatology*, Vol. 40, No. 6, pp. 3179-3195.
- 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.
- Shipley, B. (2000). *Cause and correlation in biology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Shukla, S., Safeeq, M., AghaKouchak, A., Guan, K. and Funk, C. (2015). "Temperature impacts on the water year 2014 drought in California." *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 6, pp. 4384-4393.
- Sutanto, S. J., Vitolo, C., Napoli, C. D., D'Andrea, M. and Van Lanena, H. A. J. (2020). "Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale." *Environment International*, Vol. 134, 105276.
- 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, 114013.
- Yeh, S. W., Won, Y. J., Hong, J. S., Lee, K. J., Kwon, M. H., Seo, K. H. and Ham, Y. G. (2018). "The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism." *Monthly Weather Review*, Vol. 146, No. 5, pp. 1463-1474.
- Zaitchik, B. F., Macalady, A. K., Bonneau, L. R. and Smith, R. B. (2006). "Europe's 2003 heat wave: A satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks." *International Journal of Climatology*, Vol. 26, No. 6, pp. 743-769.
- Zscheischler, J. and Seneviratne, S. I. (2017). "Dependence of drivers affects risks associated with compound events." *Science Advances*, Vol. 3, No. 6, 1700263.